第8卷 第1期
2016年2月
土木建筑工程信息技术
Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture
Vol. 8 No. 1
Feb. 2016

盾构空推过矿山法隧道施工技术及质量控制

徐延召[1] 李亚巍[2] 杨 俊[2]

（1. 中铁隧道集团有限公司，洛阳 471009；2. 华中科技大学 土木学院工程管理研究所，武汉 430074）

【摘 要】盾构法施工作为一种安全高效的隧道施工方法，在我国城市轨道交通建设中发挥着积极作用。然而一个区间往往出现局部的硬岩段，盾构掘进困难、刀具磨损大、施工进度缓慢等。当硬岩掘进达到一定长度时，通常采取"盾构法"+"矿山法"复合施工方法。该工法虽能提高施工速度，降低施工风险，但也会造成诸多问题。本文根据武汉某地铁区间施工的实际情况，介绍了盾构在中风化泥岩地层中空推过矿山法隧道施工中，盾构到达、盾构推进和盾构接收阶段的关键技术和质量控制措施，取得了良好的工程效果，为类似工程提供有益参考。

【关键词】盾构法；矿山法；空推；关键技术；质量控制

【中图分类号】U455.43；U455 【文献标识码】A 【文章编号】1674－7461(2016)01－0053－06

【DOI】10.16670/j.cnki.cn11－5823/tu.2016.01.09

引言

随着城市地下空间开发的不断深入，明挖法、矿山法、盾构法等施工技术在城市地铁等地下工程中得到广泛的应用[1]。盾构通过有孤石段、微风化高硬度岩石段时，土压及泥水平衡盾构机的刀具不能切削坚硬岩石。因此在盾构机到达岩石抗压强度较大的硬岩层前，需采用"矿山法"+"盾构法"复合工法施工。该工法虽能提高施工速度，降低矿山法开挖时风险，但也会造成诸多问题，像管片错台、管片上浮等。

陈玉新[2]根据某综合管线隧道工程，主要介绍在强风化到中风化变化花岗岩中盾构在矿山法隧道推进、拼装管片等施工技术。赵立峰[3]以杭州地铁2号线为背景，介绍了软土区中盾构在矿山法隧道推进、管片拼装等技术。高凯[4]对盾构空推过程中管片应变规律进行总结，揭示了管片易错台和出现渗漏水现象的作用机理和影响规律。谢国兵[5]根据某地铁区间实际空推穿越过程中管片错台产生的过程和成型隧道管片的轴线与设计偏差，认为影响管片的最主要因素是盾尾间隙的控制和管片上浮对隧道轴线的影响。

本文根据武汉地铁某区间盾构空推矿山法隧道实际情况，介绍了盾构在穿越中风化泥岩地层中，盾构推进、管片拼装、管片背衬回填等关键技术和质量控制措施，为类似工程提供有益参考。

1 工程概况

武汉轨道交通某盾构区间，区间工程量见表1。中间风井至汉江隧道区间穿越中风化灰岩及石英岩层，强度约33～58MPa，考虑盾构在硬岩中掘进困难、进尺速度慢等因素，该段采用"矿山法"+"盾构法"复合工法施工；汉江至北起点区间采用盾构法施工。管片为C50P12，环宽1.5m，厚度350mm，楔形量为40mm，外径6 200mm，内径5 500mm。矿山法隧道结构尺寸：净宽：6 600mm、净高：6 750mm；隧道上部为3－2粉质粘土，隧道下部为17a－1中风化泥岩。线路的最小转弯半径R＝350m；最大纵坡28‰；最大埋深37.2m；最高水土压力5Bar。

本工程北起点－中间风井盾区间采用两台泥水盾构施工，盾构机由北起点始发向中间风井掘进，隧道内完成盾构接收后空推至中间风井吊出。区间隧道剖面见图1。

【基金项目】 国家自然科学基金"基于复杂网络理论的地铁盾构施工诱发环境风险的时空演化机理与规律研究"（编号：51408245）

【作者简介】 徐延召（1983－），男，高级工程师。主要研究方向：地铁工程风险控制。

图 1　区间隧道剖面图

表 1　区间主要工程量表

区间		里程	长度	施工方法
中间风井~汉江	左线	DK11 +156.40 ~ DK11 +368.40	212.00m	矿山法 + 盾构空推
	右线	DK11 +154.74 ~ DK11 +348.95	194.21m	矿山法 + 盾构空推
汉江~北起点	左线	DK11 +368.40 ~ DK12 +319.27	950.87m	盾构法
	右线	DK11 +348.95 ~ DK12 +319.26	970.31m	盾构法

2　总体施工流程及方法

暗挖空推断总体施工流程为：导台施工→盾构到达→盾构空推过矿山法隧道施工段→盾构接收施工。

2.1　弧形导台施工

隧道开挖完成初期支护后，在隧道底部 90°范围内设置半径为 3 470mm，厚度 200mm 的弧形混凝土导向平台。施工图如图 2 所示。



图 2　施做盾构机导台

2.2　盾构到达

盾构到达施工，是指盾构机完成盾构隧道掘进，刀盘到达距盾构法隧道与矿山法隧道分界里程 30m 处开始，至刀盘通过分界里程、隧道贯通截至的施工过程。本工程拟采用水中到达的方式进行到达施工。盾构到达施工流程如图 3 所示。

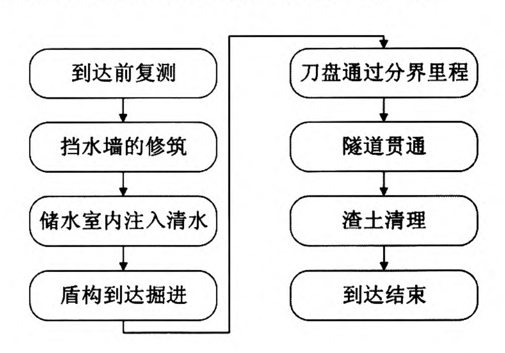


图 3　盾构到达施工流程图

2.2.1　挡水墙的设置

为确保施工安全，在中间风井侧施工的矿山法隧道内，距盾构法隧道与矿山法隧道分界里程 10m 处设置 1 堵厚 500mm 的钢筋混凝土挡水墙，见图 4。挡水墙横向、竖向主筋采用 φ20 螺纹钢间距@ 200 布置，主筋矿山法隧道初期支护内侧预埋钢筋焊结

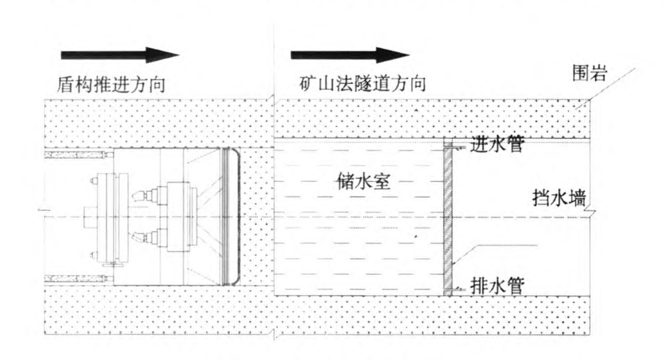


图 4　挡水墙设置示意图

形成整体，撑筋采用 Φ10@400×400 梅花形，钢筋连接采用焊接。

挡水墙顶部及底部各设置 1 个带有闸阀的 Φ100 钢管，在盾构掘进隧道贯通前从挡水墙顶部钢管注入储水室内注入清水，贯通后通过挡水墙底部钢管将储水室内泥浆及废水采用泥浆泵抽出进入排污系统，拆除挡水墙，清理施工场地。

2.2.2 管片壁后二次注浆

在盾构推进至分界里程后，停止掘进，关闭泥水循环，对盾尾后 4~6 环管片背部进行二次补充注浆。

2.2.3 最后 10 环管片连接

最后 10 环管片应严格把关三道复紧制度，刀盘抵拢掌子面停机后，再次复紧最后 10 环横向螺栓；另一方面为避免盾构贯通后，管片横向受力突然减小，环间接缝变大产生漏水，在最后 10 环管片见安装横向拉紧装置。

2.3 盾构空推过矿山法隧道施工段

到达掘进完成后(即隧道贯通后)，利用挡水墙下部排水管将储水室内的泥浆及废水排入排污系统，凿除挡水墙，清理施工场地，准备盾构空推过矿山法施工段，施工作业流程见图 5。

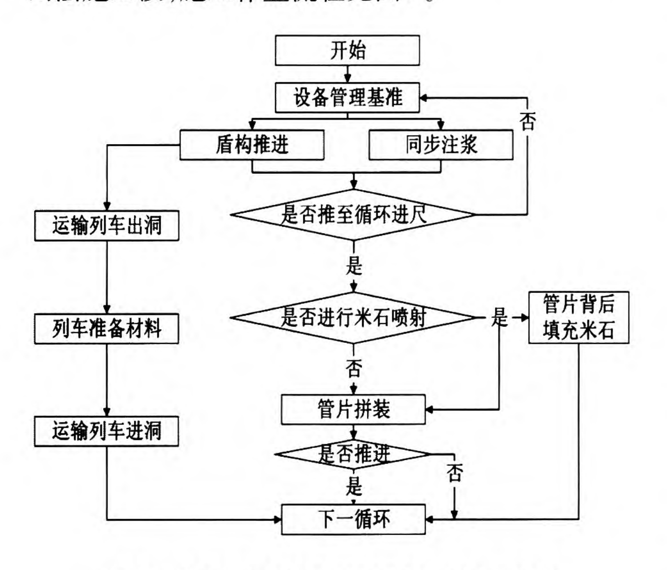


图 5 盾构空推过矿山法隧道施工作业流程

2.3.1 盾构推进

由于盾构空推过程刀盘前方无反力作用，盾构姿态不易控制，为保证隧道线形，根据刀盘与弧形导台之间的关系，调整各组推进油缸的行程，使盾构姿态沿设计线路方向推进，推进速度在 30~50mm/min 之间。盾构推进时，派专人在盾构前方检查、监测盾构推进情况，主要检查初支的开挖是否有侵入盾构刀盘轮廓初支、盾构前体下部与弧形导台的结合情况、豆砾石回填是否密实等。空推效果图见图 6。



图 6 盾构机空推

2.3.2 管片拼装

管片拼装工艺与正常掘进时的工艺相同。管片选型要根据盾尾间隙与油缸行程差结合盾构姿态选择合适的管片。通过控制盾构盾尾与管片外表面的间隙，确保管片拼装符合设计要求。管片每安装一片，先人工初步紧固连接螺栓；安装完一环后，用风动扳手对所有管片螺栓进行紧固；待管片脱出盾尾后，重新用风动扳手进行紧固。

2.3.3 管片背衬回填

管片背衬回填是指管片背后与矿山法隧道初期支护间空隙的回填密实工作，由喷射米石、盾尾同步注浆、补充注浆三部分组成。

(1)喷射米石回填

采用 5~10mm 连续级配的花岗岩米石作为回填料。管片拼装时进行喷射米石回填。喷射米石分两次：第一次，每隔 4.5~6m 在盾构机的切口四周不小于 60°~300°的范围用袋装砂石料围成一个围堰，防止管片背后的米石、砂浆前窜，用 2 台 50 的喷浆机，将喷浆机出口软管和盾壳上的喷浆管路连接，左右两侧同时吹填粒径 5~10mm 的豆砾石骨料，喷射压力为 0.25~0.3MPa。喷射豆砾石回填施工见图 7 所示。

当盾壳顶部与砂袋围堰顶部形成自然坡度时，停止喷射；第二次，管片脱出盾尾后，从管片注浆孔向管片背后吹米石，进一步填充管片与矿山法隧道的空隙。

豆砾石的充填标准：矿山法初支隧道轮廓线超

出管片外径 15cm，管片与暗挖隧道的孔隙 9.5m^3（其中弧形导台体积为 1.6m^3），喷射豆砾石填充区域为管片底部 120°，保证管片不下沉即可，要求填充率不小于 35%（填充的豆砾石和壁后间隙的体积比），每环管片需喷射米石最少 2.8m^3（可根据实际喷浆速度进行方量的调整）。豆砾石喷射施工必须左右两侧同步，高差控制在 0.8～1m，防止由于两侧骨料压力差导致管片侧移。

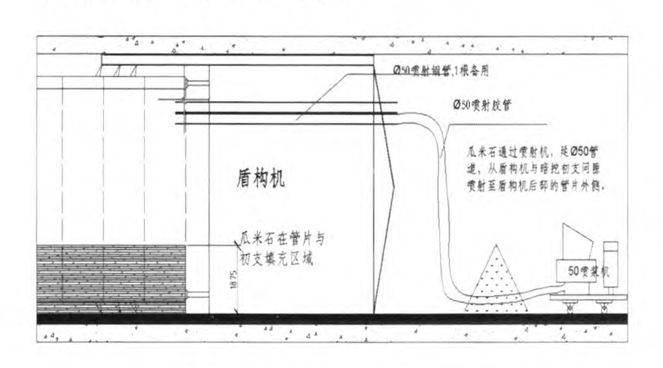


图 7　喷射米石回填示意图

（2）盾尾同步注浆

同步注浆采用水泥砂浆，初凝 8h，终凝 10.5h。同步注浆在每环管片米石回填后进行，根据盾构推进速度，以每循环达到总注浆量而均匀注入，盾构推进开始注浆开始，推进完毕注浆结束。为保证填充效果，同时防止砂浆前窜至刀盘前方，注浆压力为 0.05～0.08MPa。同步注浆时盾壳外围是敞开的，压力变化不大，不以压力作为注浆结束的控制标准。当注浆量达到理论注浆量的 80% 以上时，即可结束注浆。在管片安装 10 环后，间隔 4 环管片在管片注浆孔处开口检查注浆效果。根据检查效果，决定是否进行补充注浆。注浆量可用下式进行计算：

$$Q = V \cdot \lambda$$

式中，

λ——注浆率（取 1.5～2.5，曲线地段及砂性地层段取较大值）

V——盾尾建筑空隙（m^3）/环

$$V = \pi[(6.52/2)^2 - (6.2/2)^2] \times 1.5 = 4.8m^3$$

则：$Q = 7.2 \sim 11.0m^3$/环

（3）补充注浆

①第一次：目的是填充管片背后尤其是顶部的空洞。盾构机推进过程中，每前进 4 环通过管片注浆孔检查同步注浆效果。管片背后如果存在空洞，从管片上部 37.9°或 322.1°位置的注浆孔进行注浆。注浆时，避开封顶块位置。浆液采用水泥单液浆。浆液配比为：水泥：水 = 1：0.8。注浆压力为 0.3～0.4MPa。注浆结束标准采用注浆压力单指标控制。

②第二次：盾构机通过矿山法隧道后，根据渗漏水情况，采用双液注浆泵注浆堵水。浆液采用水泥－水玻璃双液浆。浆液配比为水泥：水玻璃为 1：1，注浆压力为 0.2～0.3MPa，注浆速度不大于 10L/min。注浆结束标准采用注浆压力单指标控制。

2.4　盾构接收施工

盾构接收施工是指盾构机刀盘抵达中间风井接收井洞门处开始，至盾构机盾尾完全脱出洞门，移动至接收架上截至的作业。盾构接收施工作业流程如图 8。

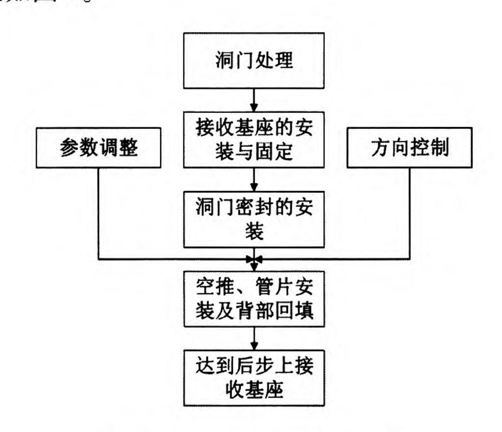


图 8　盾构接收施工作业流程

2.4.1　洞门密封的安装

盾构机到达接收井前，在接收井洞门安装洞门密封装置，主要作用是对管片背后空隙充填的米石及砂浆形成封堵，保证空隙充填效果。洞门密封装置见图 9。

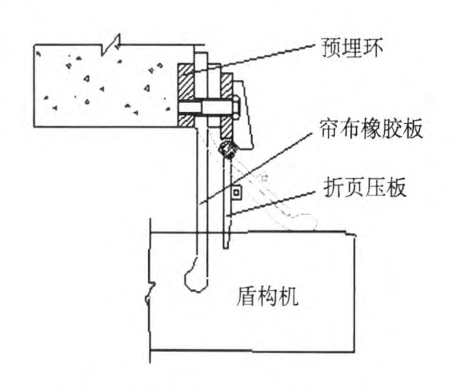


图 9　盾构接收洞门密封装置图

2.4.2 管片背部空隙的充填

盾构机刀盘抵达洞门处时,由于无法从刀盘前方喷射米石,此管片背部空隙的米石主要通过管片的二次注浆孔进行喷射,砂浆的注入通过盾构机自带的同步注浆系统与盾构推进同步进行。为保证充填效果,盾构接收施工中,米石喷射每3m进行一次。

在盾尾完全脱出洞门后,要及时对接收段管片背部空隙充填效果进行检测,对充填效果不足的部分进行二次补充注浆。亦可采用地面袖阀管注浆方式,在隧道顶部开孔,进行注浆。地面注浆必须待盾构通过后方可进行开孔和水泥浆的补注。开孔时严格控制进尺长度,确保打穿矿山法隧道初支即可。注浆完成标准以量和压力双控:灌注量不小于壁后间隙的65%,即每环平均$4m^3$;压力控制以注浆泵压力为准。并以开孔检查注浆效果作为注浆完成的标准。

2.4.3 最后20环管片的连接

最后20环管片拼装中要及时将管片连接成整体,以免在推力很小或者没有推力时管片之间的松动。拉紧联系条采用14b槽钢,在起重螺母出用M30螺栓书栓接,拉紧装置在后盾管片除前或盾构推力卸去前设置安装。

3 质量控制

3.1 盾构姿态控制

由于盾构主机的体积大(长10.5m,刀盘直径达6.52m)、质量重(重达350T),姿态调整比较困难。各个施工阶段采取以下措施进行盾构姿态的控制:

(1)弧形导台施工阶段

控制空推导台施工精度。导向平台是盾构通过硬岩隧道时的下部支撑,导向平台的施工精度直接决定着盾构的姿态。导向平台施工模板定位后必须进行测量复核,混凝土浇注后应进行标高的复测,确保导向平台的施工精度在0~+10mm以内。

(2)盾构到达阶段

调整好隧道贯通时盾构的姿态。盾构从盾构隧道进入硬岩隧道前,及时调整盾构的出洞姿态,确保盾构出洞时的滚动值Roll小于±3mm/m。盾构在导向平台上推进时,调整盾构的滚动值Roll小于±5mm/m。

(3)盾构空退过矿山法隧道施工阶段

做好管片的选型及安装。综合盾构的姿态、盾尾间隙、油缸行程及盾构推进情况等因素,合理选择管片的安装类型,控制推进油缸行程差,使盾构机姿态偏差在±20mm以内、盾尾间隙均在70mm左右,确保管片受到的油缸推力较平均,在管片脱出盾尾时,盾尾内壳不会挤压管片外壁,可有效防止管片产生错台、裂缝。

3.2 管片错台

盾构在导向平台上向前推进时,盾构的前体、中体以及盾尾的盾壳与导台是紧密接触的,只要注意管片选型与姿态调整,不会产生大的错台。

(1)盾构空推过矿山法隧道施工阶段

①每3~5环对管片姿态进行人工测量,根据测量结果结合盾尾间隙进行管片的选型。

②加强管片背后喷射豆砾石回填效果的检查,确保管片底部与硬岩隧道初期支护间空隙的充填密实度,保证管片下部有足够的支撑力。

(2)盾构接收阶段

盾构机在接收基座上推进时,每向前推进2环拉紧一次洞门临时密封装置,每1环通过从管片二次注浆孔向管片背后喷射米石1次,并通过同步注浆系统注入速凝浆液填充管片外环形间隙,保证管片姿态正确。

3.3 管片上浮

因空推段管片壁后喷射的豆砾石和同步注浆量有限,且管片壁后积水较多,同步注浆浆液未能凝固,管片中上部和矿山法隧道初支间基本处于空洞状态,积水及浆液浮力均能引起管片上浮及摆动。

(1)盾构空推过矿山法隧道施工阶段

空推施工中根据矿山法初支隧道渗漏水量的大小,在成型隧道管片腰部以下的吊装孔进行放水,避免因积水过多造成成型隧道管片上浮。隧道内的积水外排采用污水泵将污水排至中间风井,再由中间风井排送至地面。并及时对管片姿态进行人工测量复核,根据复核结果判断是否采用其他辅助措施处理。

(2)盾构接收阶段

注浆作业中可继续在盾构隧道内开孔放水,防止积水压力过大造成管片偏移或上浮。

3.4 管片防水

盾构推进通过硬岩隧道时,盾构盾壳与导向平台间的摩擦力约100t,管片与盾尾尾刷间的摩擦力20t,拖拉后配套的拉力75t,即盾构在导向平台上向

前推进所需反力为195t。为保证管片的防水效果，施工中采取以下措施：

盾构空推过矿山法隧道施工阶段如下：

(1)安装管片时，在该环管片的螺栓紧固完毕后，对上一环管片的螺栓进行二次紧固，以保证管片的块与块之间、环与环之间的紧密连接。

(2)在管片拖出盾尾后，迅速再次对螺栓进行复紧。

4 结语

根据该工程盾构法空推过矿山法隧道的实际过程中采取的关键技术和为确保施工质量采取的质量控制措施得出以下结论：

(1)盾构到达阶段采用水中到达的方式进行到达施工。与传统到达施工方法相比，施做挡水墙具有施工速度快、工程造价低、拆除方便的优点。

(2)盾构空推过矿山法隧道施工阶段，因盾壳外围是敞开的，仅以注浆量达到理论注浆量的80%以上作为结束标注；补充注浆结束标准采用注浆压力单指标控制。

(3)盾构空推矿山法隧道施工控制的关键主要包括管片的拼装质量和隧道轴线与设计轴线偏差，即管片错台、管片上浮、盾构姿态、盾尾间隙和导台的施工精度等。

参考文献

[1] 侯学渊，钱达仁，杨林德. 软土工程施工新技术[M]. 安徽科学技术出版社，1999.
[2] 陈玉新. 盾构在矿山法隧道推进技术[J]. 中国中铁隧道集团2007年水底隧道专题技术交流大会论文集，2007.
[3] 赵立锋. 杭州地铁2号线盾构软土区过硬岩技术研究[J]. 铁道标准设计，2015，59(6)：103-107.
[4] 高凯. 盾构在矿山法隧道中空推管片纵向受力分析[J]. 山西建筑，2012，38(10)：183-184.
[5] 谢国兵. 盾构空推过曲线暗挖隧道的管片质量控制[J]. 铁道建筑技术，2014，9：5.

Technology and Quality Control of Shield Empty Across the Mining Method for Tunnel Construction

Xu Yanzhao[1], Li Yawei[2], Yang Jun[2]

(1. *China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang* 471009, *China*
2. *School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: Shield method construction, as a kind of safe and effective method of tunnel construction, plays a positive role in the construction of urban rail transit in our country. However, an interval, including partial hard rock section, is difficult for shield tunneling machine to push forward. When the hard rock drivage reaches a certain length, we usually use "shield law" + "mines" composite construction method. Although this method can improve the construction speed and reduce the construction risk, but also causes many problems. According to the actual situation of Wuhan subway construction, this paper introduces the key technologies and quality control measures of shield to shield, shield advance and receiving phase with good results in the weathered mudstone formation of the hollow push mining method in tunnel construction, providing a useful reference for similar projects.

Key Words: Shield Method; Mining Method; Empty Pushing; Construction Technology; Quality Control